第 39 卷　第 4 期
2021 年 12 月
天　文　学　进　展
PROGRESS IN ASTRONOMY
Vol. 39,　No. 4
Dec., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.04.09

基于星地双向时间比对数据的北斗三号铷原子钟在轨性能评估

王鹏飞[1,2]，王　芳[1,2]，赵　峰[1,2]，安绍锋[1,2]，梅刚华[1,2]

(1. 中国科学院　精密测量科学与技术创新研究院，武汉　430071；　2. 中国科学院原子频标重点实验室，武汉　430071)

摘要： 星载原子钟是导航卫星的核心设备，其性能直接决定卫星导航系统的授时和定位精度。铷原子钟以其体积小、重量轻、功耗低和可靠性高等特点，在北斗导航系统中大量使用。利用北斗系统星地双向卫星钟差数据对北斗三号卫星在轨铷原子钟性能进行了评估。首先对数据进行了钟差转频差和中位数去粗差处理，然后重点评估了铷原子钟的频率漂移率和频率稳定度。结果显示，北斗三号铷原子钟多为负漂移，频率漂移率优于 2×10^{-13} d^{-1}，且呈缓慢减小趋势，运行初期，每天变化量级为10^{-15}，运行 2 a 后，天漂趋于平稳。计算得到铷原子钟的千秒稳定度、万秒稳定度和天稳定度分别为 4×10^{-13}, 1×10^{-13} 和 3×10^{-14} 左右，与地面实际测试结果差异较大，该结果受钟差传输过程中引入的噪声限制，未能反映铷原子钟的稳定度真实水平。

关　键　词： 北斗导航系统；星载铷原子钟；钟性能评估；漂移率；稳定度

中图分类号： P127.1　　　**文献标识码：** A

1　引　言

星载原子钟是导航卫星的核心设备，其性能直接决定卫星导航系统的授时和定位精度。铷原子钟以其体积小、重量轻、功耗低和可靠性高等特点，在世界各大卫星导航系统中广泛使用，其中美国的全球定位系统 (global positioning system, GPS) 使用最多。GPS III 卫星只装备了铷原子钟，我国的北斗三号系统卫星也大量配置了铷原子钟。在轨铷原子钟的性能评估一直是卫星导航研究的重要课题之一。当前，关于北斗系统铷原子钟性能评估的研究较多[1–3]，大多采用多项式模型对钟差数据进行处理及分析，得到铷原子钟准确度、漂移率和稳定度性能的基本情况，但缺乏对这些评估结果的进一步综合分析和比较。根据原子钟的

收稿日期： 2021-03-24；　**修回日期：** 2021-04-25

资助项目： 转发式试验系统总体课题 (Y9E0151M26)

通讯作者： 梅刚华，mei@apm.ac.cn

工作原理，原子钟最终输出频率锁定在原子跃迁频率上。当原子跃迁频率受物理因素影响产生变化时，原子钟的输出频率随之相应变化。若引起频移的物理效应随时间变化符合一定的规律，则该规律会在钟输出频率变化中得到直观体现，因此，频差数据的物理内涵更清晰，更易于建模，对频差数据的分析有利于进一步评估铷原子钟的性能特性。而钟差体现的是相关规律随时间的累积效果，建模较复杂。因此，在原子钟性能评估中，我们通常分析频差数据。

本文基于北斗三号系统星地双向卫星钟差数据，首先将其转换为频差数据，再对频差数据进行处理和分析，然后评估了在轨铷原子钟的性能，最后对相关结果进行了分析和讨论。

2 钟差数据预处理方法

钟差数据预处理主要分两步，首先是将钟差数据按时间微分得到频差数据，然后剔除频差数据中粗差和跳点。上述过程的主要难点是如何较准确地剔除数据中的粗差和跳点。目前最常用的去粗差的方法是中位数法 (median absolute deviation, MAD)[4]。若数据本身随时间单调变化，采用中位数法直接对数据进行预处理时，往往只能去掉较大的粗差和跳点。为较好地剔除数据粗差，可先将数据中的单调项扣除并得到残差，再使用中位数法判断残差中粗差点的位置，最后将原数据中相应位置的粗差点剔除。该方法在文献 [2] 和 [5] 中都有使用。本文的处理方法为：先将频差数据按取样时间做10次平均，然后采用线性拟合的办法扣除频差中的单调变化项，最后再利用中位数法剔除频差中的粗差和跳点。

3 铷原子钟性能评估方法

铷原子钟输出频率的相对偏差可表示为：

$$y(t) = a_0 + a_1(t) + \varepsilon(t) \quad , \tag{1}$$

其中，a_0 表示此时原子钟与其标称频率 (通常是 10 MHz 或 5 MHz) 的偏离程度，并用准确度来表征，$a_1(t)$ 表示钟的相对频偏在时间间隔 t 内的定向变化，反映为钟的频率漂移特性，$\varepsilon(t)$ 表示钟的相对频偏在时间间隔 t 内的不确定性，与钟内原子鉴频信号中的一些随机噪声相关，常用频率稳定度评价。对于正常工作的星载铷原子钟，性能评估的重点是频率漂移率和频率稳定度，两者分别决定了准确度的变化规律和不确定范围。

漂移率的评估通常采用对长时间的频率数据按某些数学模型拟合来实现。对铷原子钟来讲，短时间内其漂移率近似为线性漂移，漂移率可由最小二乘法求解。

频率稳定度常用相对频偏的阿伦方差[6]来表征。当原子钟的输出频率存在定向的漂移时，阿伦方差不能真实反映原子钟的频率稳定度。对于铷原子钟来讲，常需要采用数值方法，按照一定的数学模型，先扣除频率数据中的漂移项，然后再用频率残差评估频率稳定度。另外，利用阿伦方差评估原子钟频率稳定度要求测试数据是无间断采样获得的，而北斗

中轨道 (medium earth orbit, MEO) 卫星的星地钟差数据是间断的，直接使用该数据评估得到的频率稳定度与真实值之间存在偏差，需要修正。本文采用文献 [7] 中的方法对评估结果进行修正。

4　性能评估结果

北斗三号系统以铷原子钟为主钟的卫星共 12 颗，均为 MEO 卫星，相关情况示于表 1。其中 46－49 号卫星所用铷原子钟为中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 (精测院) 研制，为简化，下文的卫星编号表示相应卫星的铷原子钟。

表 1　以铷原子钟为主钟的北斗三号卫星情况

卫星编号	36, 37	38, 39	40, 41	42, 43	46, 47	48, 49
发射时间	2017-11-05	2018-02-12	2018-07-29	2018-09-19	2018-11-19	2019-12-16

本文以 2020 年 1 月 1 日至 3 月 31 日的北斗系统星地双向卫星钟差相位数据为原始数据，按照本文第 2 章中的方法转换为频差数据，再采用第 3 章的方法对北斗三号在轨铷原子钟性能进行评估，具体结果如下。

4.1　漂移特性

本文以天频率漂移率 (天漂) 来表征铷原子钟的频率漂移特性。为全面评估漂移特性，本文采用测量时长为 17 d 的频差数据计算得到一个天漂，即计算第 i 天的天漂时，使用第 $(i-16)$ 天至第 i 天连续测量的频差数据算得。各铷原子钟的天漂移率及其随时间变化情况示于图 1。从整体来看，除 36 号铷原子钟外，其余 11 台铷原子钟天漂均为负值。我们注意到 GPS 系统星载铷原子钟也多为负漂移特性[8]，精测院研制的铷原子钟在地面真空环境测试时也均呈现负向漂移，这应该与铷原子钟自身的工作原理相关。各铷原子钟在 2020 年 3 月底的天漂示于表 2，从天漂的具体数值来看，各铷原子钟的天漂绝对值均优于 2×10^{-13}，其中 36 号卫星铷原子钟的天漂优于 1×10^{-14}，与在轨氢钟的天漂接近[2]。

表 2　星载铷原子钟频率漂移率评估结果

铷原子钟编号	36	37	38	39	40	41	42	43	46	47	48	49
天漂/10^{-13}	0.06	−1.4	−1.0	−1.0	−1.7	−1.0	−1.6	−1.0	−1.0	−1.4	−1.9	−1.8

从天漂随时间变化趋势来看，可将各铷原子钟分为 3 组，其中 48 和 49 号为第 1 组，38－43, 46, 47 号为第 2 组，36 和 37 号为第 3 组，1－3 组钟的天漂分别对应图1a) , b), c)。第 1 组钟的天漂随时间变化较快，其中 48 号钟的天漂还存在波动现象，第 2 组钟的天漂随时间缓慢减小，天漂每天变化约为 3×10^{-16}，第 3 组钟的漂移率趋于稳定。下面对这种现象进行分析。

引起铷原子钟频率漂移的因素较多，如抽运光强度衰减[9]、原子泡内He渗透[10]、原子

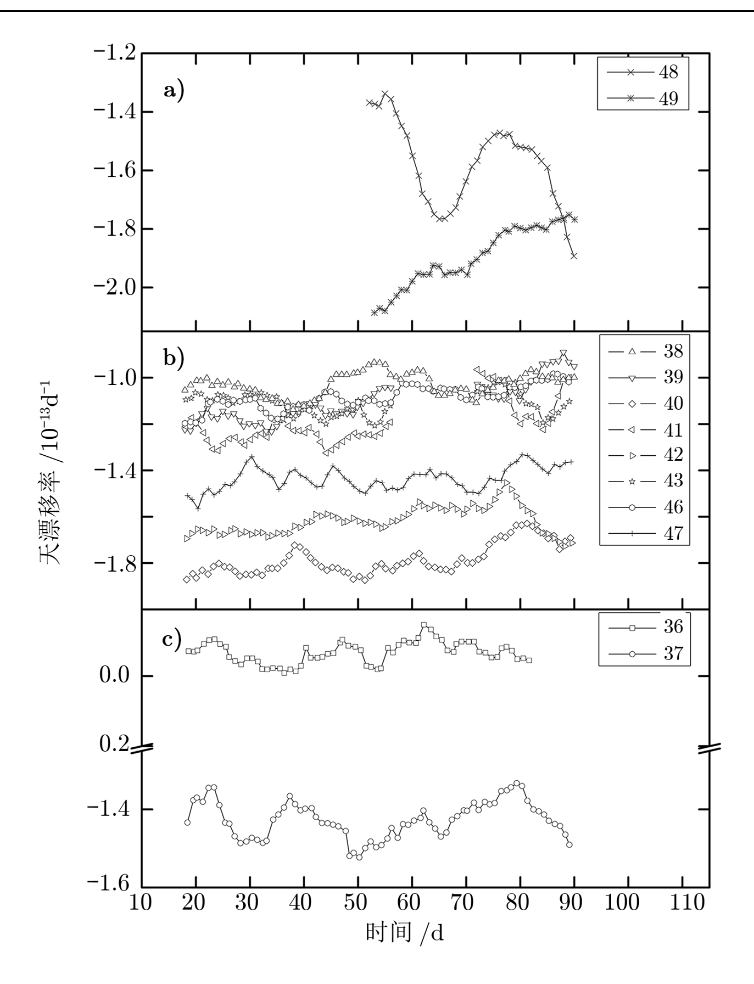


图 1　在轨铷原子钟天漂移率随时间变化情况

泡内缓冲气体分子向泡壁扩散[11]、电子元器件老化等，目前还没有明确结论表明哪种因素起决定作用。根据不同的物理机理，铷原子钟输出频率随时间变化的模型有指数模型、扩散模型和对数模型等[12]，分别对应于抽运光强衰减、原子泡内气体扩散和电子元器件老化带来的漂移，具体表达如下：

指数模型：

$$y = a + b \times \exp(t/c) \quad , \tag{2}$$

扩散模型：

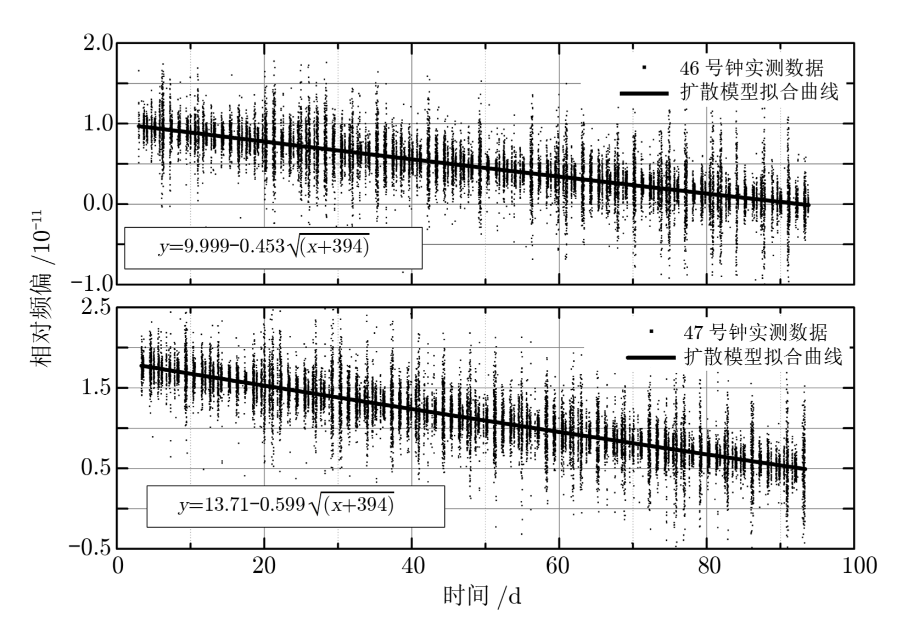
$$y = a + b \times \sqrt{(t + c)} \quad , \tag{3}$$

对数模型：

$$y = a \times \ln(b \times t + 1) \quad , \tag{4}$$

其中，a, b, c 为常数，t 表示时间。

三种模型都表明，铷原子钟运行初期频率漂移率较大，一段时间后趋于平稳。三种模型在铷原子钟平稳运行的初期差异性较大，由于 48 号和 49 号星载钟运行时间较短，其运行状态尚未平稳，漂移率变化还不稳定。所以本文采用处于平稳运行初期的 46 号和 47 号卫星钟的频差，按以上模型进行数据拟合分析。拟合发现，频差随时间变化与扩散模型符合较好，初步显示原子泡内气体扩散可能是影响该铷钟漂移的主要原因，具体结果示于图 2。



注：其中散点图为去粗差并按 600 s 平滑后的频差数据，实线为拟合曲线。

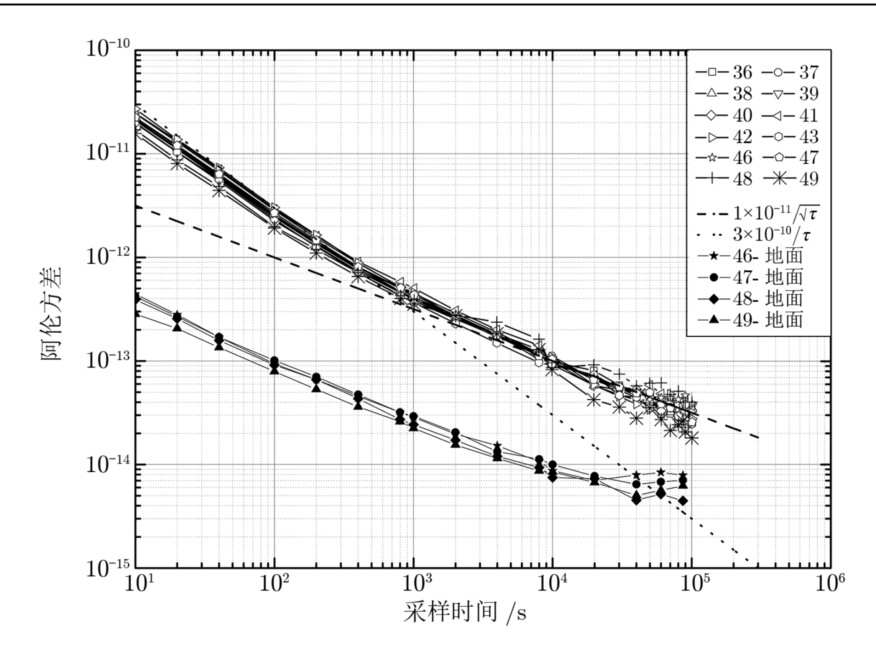
图 2　46 和 47 号星载铷原子钟相对频率偏差随时间变化曲线

根据图 2 中拟合结果，可以推算该铷原子钟稳定运行初期天漂每天变化 10^{-15} 量级，连续运行 1 a 后天漂每天变化为 10^{-16} 的量级，连续运行 2 a 后天漂每天变化约 10^{-17} 量级。根据该结果，我们认为第 3 组钟运行时间超过 2 a，其 90 d 内天漂变化为 10^{-15} 量级，这与铷原子钟自身漂移率 (10^{-13} d^{-1}) 相比可忽略不计，可认为在该时间尺度内第 3 组钟的漂移率已趋于平稳，第 2 组钟运行时间多在 1~2 a 之间，其 90 d 内天漂变化为 10^{-14} 量级，因此在该时间尺度下还能显示出天漂的缓慢变化。

4.2　稳定度性能

在评估铷原子钟稳定度之前，我们先扣除频差数据中的漂移项，得到残差项，然后采用上文中的方法评估残差的稳定度，具体结果见图 3 和表 3。

稳定度评估结果显示，各卫星铷原子钟的 1 000 s 频率稳定度多在 $(3\sim4)\times10^{-13}$ 之间，万秒稳在 1×10^{-13} 左右，天稳在 3×10^{-14} 左右。从稳定度曲线来看，各铷原子钟的 10~1 000 s 稳定度随取样时间的变化基本符合 $3\times10^{-10}/\tau$ 的关系，这是白相位噪声限制的结果。各铷原子钟的万秒稳到天稳随取样时间的变化基本符合 $1/\sqrt{\tau}$ 的关系，且每台铷原子钟的白频噪声限制相近，均约为 $1\times10^{-11}/\sqrt{\tau}$。



注：空心点划线为在轨钟稳定度曲线，实心点划线为 46, 47 号星载钟地面测试时的稳定度曲线，短虚线表示 $3\times10^{-10}/\tau$ 的稳定度曲线，长虚线表示 $1\times10^{-11}/\sqrt{\tau}$ 的稳定度曲线。

图 3 北斗三号星载铷原子钟频率稳定度曲线

表 3 星载铷原子钟频率稳定度评估结果

铷钟编号	频率稳定度		
	1 000 s (10^{-13})	10 000 s (10^{-13})	1 d (10^{-14})
36	3.9	1.0	2.9
37	4.5	1.1	3.6
38	3.9	0.9	3.3
39	4.2	1.0	2.9
40	3.8	1.0	3.0
41	5.0	1.0	2.9
42	4.6	1.1	3.2
43	3.7	0.9	4.1
46	4.1	1.0	3.3
47	4.3	1.0	3.7
48	3.9	0.9	4.0
49	3.5	0.8	2.6

由于 46－49 号铷原子钟为精测院研制，所以在图 3 中我们还给出了这几台铷原子钟在地面真空环境下测试时的稳定度结果，与上述评估结果存在较大差异，分析如下。

我们认为上述稳定度评估结果虽然客观反映了星地钟差的稳定度情况，但没有体现出卫星铷原子钟的真实稳定度水平，主要理由有两点。第一，星地钟差数据在传输过程中会引入多种噪声[13]，从而恶化星地钟差的稳定度，但并不表示卫星钟自身稳定度变差。星上主、备钟比相数据在传输过程中引入的噪声较小，因此利用比相数据可更准确地评估卫星钟的

稳定度性能，文献[14]利用比相数据评估北斗三号卫星钟的稳定度，显示其铷原子钟 1 000 s 稳优于 4×10^{-14}，10 000 s 稳优于 2×10^{-14}，天稳多优于 1×10^{-14}。第二，48 和 49 号卫星铷原子钟的频差数据在 2020 年 2 月 11 日至 20 日 (对应图 4 中第 41 至第 50 d) 的噪声水平相对较低，使用该时段数据我们通过评估能得到更好的稳定度结果，见图 5，其 1 000 s 和 10 000 s 稳定度性能提升了近 2 倍。需要说明的是此时铷钟运行状态虽然还未稳定，但这对铷钟中短期稳定度的评估准确性影响很小，因此图 4 中的结果是可信的。由于卫星钟频率稳定度不可能存在较大波动，据此判断此卫星钟的千秒稳和万秒稳至少分别优于 1×10^{-13} 和 3×10^{-14}。

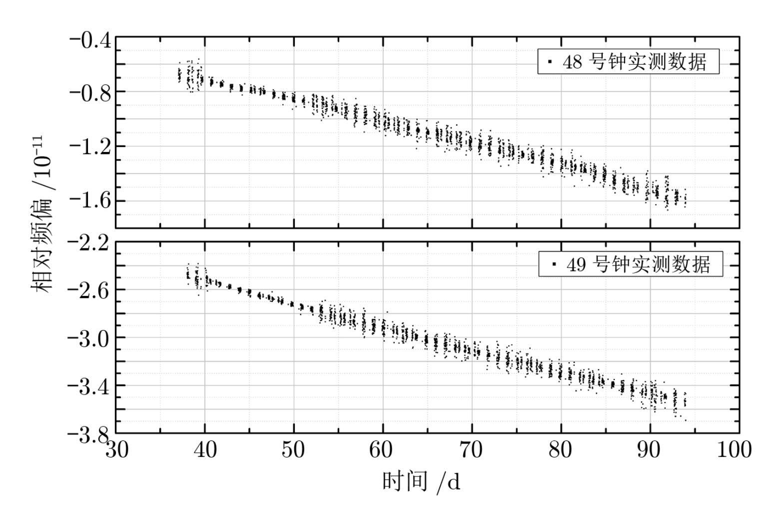


图 4　48 和 49 号卫星铷原子钟去粗差并按 600 s 平滑后的相对频差数据

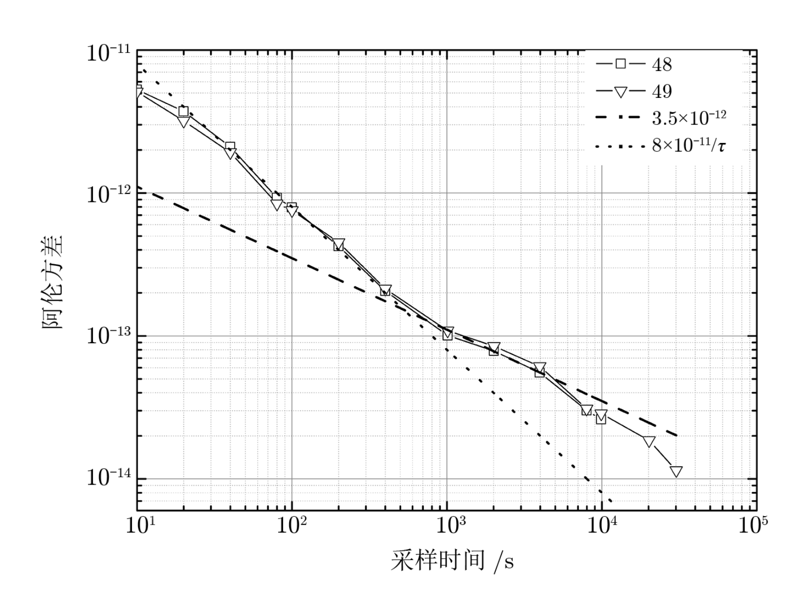


图 5　48 和 49 号卫星铷原子钟频率稳定度曲线

5 小结与讨论

本文利用北斗双向星地钟差评估了在轨铷原子钟的频率漂移率和稳定度性能，得到其2020 年 3 月 31 日的漂移率和稳定度评估结果，见表 2。主要结果如下所述。

(1) 北斗三号在轨铷原子钟天漂绝对值优于 2×10^{-13}，且多数为负漂移。铷原子钟漂移率随时间缓慢变化，其绝对值呈减小趋势。

(2) 利用扩散模型，能较好地解释铷原子钟漂移率缓慢变化的现象。研究同时表明，在轨运行初期天漂每天变化为 10^{-15} 的量级，连续平稳运行 1 a 后，天漂每天变化为 10^{-16} 的量级，运行 2 a 后，铷原子钟漂移率趋于平稳。

(3) 基于星地钟差评估得到在轨铷原子钟千秒稳、万秒稳和天稳分别为 4×10^{-13}, 1×10^{-13} 和 3×10^{-14} 左右的水平，与铷原子钟地面测试结果差异较大，我们判断这未能真实反映铷原子钟的真实稳定度水平。

基于以上结果，以下几点值得讨论。

(1) 考虑到铷原子钟漂移率的缓变特性，对其进行天级以上的钟差预报时需选择合适的模型。目前部分文献在做北斗系统长期钟差预报研究时，仅采用二次项模型，即将星载钟的频率漂移率视为定值，但对于铷原子钟，尤其是运行时间小于 2 a 的铷原子钟，该预报方法会带来一些偏差，所得研究结果可能不准确，具体影响还要进一步研究。我们建议研究利用对数或者扩散模型来做长期钟差预报。

(2) 星地钟差的稳定度评估结果受星地钟差传输过程中引入的噪声限制，这意味着在轨铷原子钟的性能并没有得到充分发挥。研究如何降低这些噪声，可有利于提高北斗三号系统授时定位精度。

致谢

该研究是在转发式试验系统总体课题 (Y9E0151M26) 的资助下完成。我们同时感谢中国科学院上海天文台潘军洋老师的有益讨论。

参考文献：

[1] 黄观文, 余航, 郭海荣, 等. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(7): 982
[2] Sun Y F, Meng Y S, Du E W, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings: Volume II, Singapore: Springer, 2020:453
[3] 杨玉锋, 彭勇, 刘梦晗, 等. 导航定位学报, 2021, 9(1): 53
[4] Bartoccini U, Barchi G, Nunzi E. 2009 IEEE International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement, New York: IEEE, 2009: 109
[5] 王东霞, 郭睿, 谢金石, 等. 测绘学报, 2018, 47(S0): 61
[6] Allan D W. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2): 221
[7] Wang P F, Xiao S H, Zhao F, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume III, Singapore: Springer, 2014: 441

[8] Phelan J, Dass T, Freed G, et al. Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, New York: IEEE, 2005: 19

[9] Camparo J C. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52: 1075

[10] Camparo J C, Klimcak C M, Herbulock S J. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54: 1873

[11] Camparo J C. 36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Washington D C: Springer, 2004: 393

[12] Epstein M, Dass T, Rajan J, et al. 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, California: Springer, 2007: 59

[13] 巩秀强, 陈俊平, 周善石, 等. 天文学进展, 2019, 37: 178

[14] 林宝军, 李绍前, 董日昌, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2021, 51: 019514

Performance Analysis of BD III Satellite Rubidium Atomic Clock Based on Satellite-ground Two-way Time Transfer Data

WANG Peng-fei[1,2], WANG Fang[1,2], ZHAO Feng[1,2], AN Shao-feng[1,2], MEI Gang-hua[1,2]

(1. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. CAS Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Wuhan 430071, China)

Abstract: Space-borne atomic clocks are crucial components of the navigation satellites, whose performance determines the timing and positioning precision of the satellite navigation system directly. The rubidium atomic clocks are widely used in the navigation system for its small size, light weight, low power and high reliability. The performance of rubidium atomic clocks on-board BeiDou III satellites was analyzed based on the satellite-ground clock offset. First, we converted the clock offset to fractional frequency offset, and then essentially estimated the frequency drifts and frequency stabilities of the rubidium atomic clocks. The results show that nearly all rubidium atomic clocks have negative frequency drifts, which are better than 2×10^{-13} d^{-1}. The absolute value of the frequency drift was decreasing slowly, and the amplitude was on the order of 10^{-15} in the early stage of operation, and the frequency drift was nearly unchanged after working more than 2 years. The estimation showed that the rubidium clock was of typical performance of 4×10^{-13} for 1 000 s, and 1×10^{-13} and 3×10^{-14} for 10 000 s and day stability respectively. The estimated results differed largely from the test results on the ground. The estimated results are mostly the noise limit introduced during clock signal transmission, failing to reflect the true level of

stabilities of rubidium atomic clocks.

Key words: BeiDou navigation system; space-borne rubidium atomic clock; clock performance estimation; frequency drift; frequency stability

. . . .

《天文学进展》征稿启事

一、本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

二、来稿须包括：题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

三、来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出，以利非本分支学科的读者阅读。

四、摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法，不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表，英文摘要应有近一页的篇幅。

五、关键词请尽可能参照 ApJ., MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用，可适当扩充。

六、稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献 (按文中出现顺序编码，在右上角用小方括号标出)。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

七、审定稿后需提供清稿样的电子文本。本刊采用中西文 Latex 系统软件排版，请从本刊网站 (http://202.127.29.4/twxjz/index.htm) 下载排版模版。

八、图、表务求精、简、规范，以配合文字阐明观点。公式务求精约，杜绝公式推导过程。

九、请勿一稿两投。来稿请通过 E-mail 发送至 twxjz@shao.ac.cn。

《天文学进展》编辑部

2021 年 12 月